

## Важнейшие результаты научных исследований, полученные в ИПСМ РАН в 2016 г.

1. Установлено, что экспериментальный сплав состава Ti-45Al-5Fe-5Nb (ат. %) на основе фаз  $\gamma(\text{TiAl})+\tau_2(\text{Al}_2\text{NbTi})$  обладает повышенной пластичностью и прочностью на сжатие при комнатной температуре и приемлемой прочностью при повышенных температурах по сравнению с  $\gamma(\text{TiAl})$  сплавами последнего поколения. При комнатной температуре были получены следующие свойства на сжатие:  $s_{1,25} = 960$  МПа,  $s_{\text{макс.}} = 2250$  МПа,  $e = 28\%$ , тогда как сплав Ti-45Al-5Nb-1Mo-0.2V продемонстрировал  $s_{1,25} = 930$  МПа,  $s_{\text{макс.}} = 1655$  МПа и  $e = 16\%$ . Новый сплав показал улучшенную технологическую пластичность при повышенных температурах ( $T \geq 800^\circ\text{C}$ ). Потенциальное применение нового сплава – в качестве лопаточного материала с рабочей температурой до  $700\text{--}750^\circ\text{C}$ . Предполагается, что свойства нового сплава позволят изготавливать лопатки с помощью штамповки при относительно низких температурах

### Опубликован в статье:

Nazarova T.I., Imayev V.M., Imayev R.M., Fecht H.-J. Study of microstructure and mechanical properties of Ti-45Al-(Fe,Nb) (at. %) alloys// *Intermetallics*. 2017. V. 82. P. 26-31.

---

2. Предложен новый экспериментальный сплав на основе титанового сплава ВТ8 состава ВТ8-20Zr-0,1V (вес. %). Новый сплав относится к сверхпрочным титановым сплавам. Для него были получены следующие свойства на растяжение:  $s_B = 1560$  МПа и  $d = 4\%$  при комнатной температуре,  $s_B = 1230$  МПа и  $d = 14\%$  при  $T = 500^\circ\text{C}$ . Достигнутая удельная прочность при  $T = 500^\circ\text{C}$  ( $s_B/\rho \approx 248$  МПа/г $\times$ см $^{-3}$ ) является рекордной при этой температуре для всех известных титановых сплавов. Установлено, что легирование цирконием значительно повышает эффективность термического упрочнения за счет необычного для титанового сплава с относительно невысоким коэффициентом  $\beta$ -стабилизации мартенситного превращения  $\beta \rightarrow \alpha''$  с сохранением остаточной  $\beta$ -фазы при закалке из  $\beta$ -области и образования тонкодисперсной пластинчатой структуры с нанометрической толщиной пластин при последующем старении. Новый сплав может быть использован как конструкционный материал с рабочей температурой до  $500^\circ\text{C}$  в тех случаях, когда требуется повышенная удельная прочность

### Опубликован в статье:

Гайсин Р.А., Имаев В.М., Гайсина Э.Р., Шаймарданов Р.А., Имаев Р.М. О необычно высокой прочности двухфазного титанового сплава на основе ВТ8, высоколегированного цирконием // *Письма о материалах*. 2016. Т. 6. Вып. 4. С. 327-332.

---

3. Методом молекулярной динамики исследованы дискретные бризеры в наводороженном графене. Предложена и обоснована гипотеза о том, что дискретные бризеры могут выступать активаторами разводороживания, поскольку при повышенных температурах отрыв атома водорода происходит с большей вероятностью, если он является ядром дискретного бризера. Данное направление исследования является важным для водородной энергетики, поскольку исследуется возможность использования графена для транспортировки и хранения водорода.

#### **Опубликован в статьях:**

Ю.А. Баимова, Р.Т. Мурзаев, И. П. Лобзенко, С.В. Дмитриев, К. Zhou. Дискретные бризеры в графене: влияние температуры. Журнал экспериментальной и технической физики. 2016. Т. 149. Вып. 4. С. 1-6;

С.В. Дмитриев, Е. А. Корзникова, Ю. А. Баимова, М.G. Velarde. Дискретные бризеры в кристаллах. Успехи физических наук. 2016. Т. 186. Вып. 6. С. 471–488.

---

4. Установлено, что при электроосаждении покрытий из электролитов, содержащих соли меди, сурьмы и олова, на медной и бронзовой подложке образуется твердый раствор олова, содержащий фазы  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  и  $\text{Sn}_3\text{Sb}_2$ , по составу близкие к оловянному баббиту Б83 ( $\text{Sn}_{11}\text{Sb}_{5.5}\text{Cu}$ ). Полученные покрытия в 8-10 раз снижают интенсивность массового изнашивания меди и бронзы на стадии приработки, а на стадии устойчивого износа наблюдается снижение интенсивности массового изнашивания в 3 раза. Проведено компьютерное моделирование процесса износа полученного таким образом покрытия подшипника скольжения. Показано, что наличие покрытия толщиной 0,1 мм с мелкодисперсными и равномерно распределенными частицами  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  примерно на 15% снижает максимальные напряжения в баббитовом вкладыше и на 12% - в корпусе подшипника.

#### **Опубликован в статьях:**

Валеева А.Х., Валеев И.Ш. Исследование покрытий  $\text{SnSbCu}$ , электроосажденных на бронзу и медь. Письма о материалах. 2016. Т. 6. Вып. 2. С. 122-125

Валеева А.Х., Валеев И.Ш., Ахунова А.Х. Моделирование на DEFORM-2D контактных давлений при работе подшипников скольжения из баббита Б83. Фунд. пробл. совр. материаловедения. 2016. Т. 13. № 4. С. 530-533.

---

5. Проведены испытания на циклическую трещиностойкость по схеме трехточечного изгиба с нанесенной усталостной трещиной образцов титанового сплава  $\text{Ti-6Al-4V}$  различной микроструктурой (крупнозернистая пластинчатая, мелкозернистая глобулярная и бимодальная дуплексная), а также его твердофазных соединений, полученных линейной сваркой трением. На основе сравнения кинетических диаграмм скорости роста усталостных трещин показано, что циклическая трещиностойкость сварных соединений не уступает трещиностойкости основного металла - титанового сплава  $\text{Ti-6Al-4V}$  в состоянии с мелкозернистой структурой.

#### **Опубликован в тезисах:**

Кашаев Р.М., Нагимов М.И., Хуснуллин А.М. Циклическая трещиностойкость соединения титанового сплава  $\text{Ti-6Al-4V}$ , полученного линейной сваркой трением // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы. Сборник тезисов докладов открытой школы-конференции стран СНГ. Уфа. РИЦ БашГУ. 2016. С. 69.

**Сведения о результатах по направлениям исследований в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, полученных в 2016 году**

Номер и наименование направления фундаментальных исследований	Полученные результаты
<b>II. ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ</b>	
<p>8. Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости</p>	<p>Обнаружено явление аномального роста зерен фазы Y123 при горячем кручении под давлением высокотемпературной сверхпроводящей керамики Y123. Аномальные зерна формируются на ранней стадии деформации, и их размер монотонно растет с увеличением угла кручения <math>\alpha</math>. Предполагается, что эти зерна появляются в местах локализации наиболее интенсивного проскальзывания по границам зерен. Плотность аномально крупных зерен растет до определенной степени деформации, определяемой преимущественно углом кручения, а при дальнейшем возрастании <math>\alpha</math> резко уменьшается благодаря развитию динамической рекристаллизации.</p> <p>Установлен механизм измельчения частиц вторичных фаз <math>(Sr,Ca)_{14}Cu_{24}O_{41}</math> и <math>(Sr,Ca)_2CuO_3</math> при горячей деформации высокотемпературной сверхпроводящей керамики на основе фазы <math>Bi(Pb)2223</math>. Причиной измельчения частиц является динамическая рекристаллизация в матричной фазе <math>Bi(Pb)2223</math>, в результате которой зерна <math>Bi(Pb)2223</math> прорастают через указанные частицы.</p> <p>Обнаружен эффект деформационно-стимулированного роста колоний <math>Bi(Pb)2223</math> при деформации, проявляющийся в том, что с уменьшением скорости кручения размер колоний уменьшается. Учет этого эффекта позволит разработать режимы получения микроструктуры, сочетающей острую текстуру и малый размер колоний, что, как ожидается, увеличит энергию пиннинга магнитных вихрей, связанную с малоугловыми границами.</p> <p>Проведено исследование микроструктуры и механических свойств образца сварного соединения магнитотвердого сплава 25X15K и</p>

малоуглеродистой стали после термообработки на высококоэрцитивное состояние. Показано, что после термообработки в магнитотвердом сплаве 25X15K происходит распад твердого раствора на изоморфные фазы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  без изменения размера зерен. В малоуглеродистой стали размер зерен несколько увеличивается. Такая термообработка снижает предел прочности соединения с 540 МПа до 255 МПа, что, тем не менее, превышает значение предела прочности литого магнитотвердого сплава 25X15K в высококоэрцитивном состоянии.

Изготовлена газоразрядная лампа, которая позволяет измерять токи газового разряда с четырех катодов одновременно. Проведены измерения вольтамперных характеристик газового разряда с образцов сплава АМг6 и никеля с различным размером зерен, определена их эффективность в качестве холодных катодов. Показано, что эффективность холодных катодов из образцов с малым размером зерен ( $d=200$  нм) превышает на 20-30% эффективность холодных катодов из образцов с большим размером зерен ( $d>2$  мкм). Повышение эффективности связано со снижением работы выхода электронов в образцах холодных катодов с уменьшением размера зерен.

Исследовано влияние низкотемпературной деформационно-термической обработки на твердость и магнитные свойства полумагнитотвердой мартенситностареющей стали ЭП 836 ВД. Показано, что старение при  $250^\circ\text{C}$ , введенное дополнительно после используемой ранее обработки, завершающейся старением при  $550^\circ\text{C}$ , приводит к дальнейшему увеличению твердости от HRC 52 до HRC 55-57, а коэрцитивная сила и остаточная индукция материала при этом увеличиваются на 5-10%, достигая 3,5 кА/м и 0,9 Тл, соответственно.

Предложена трехмерная модель строения межфазных  $b/a$  границ в сплавах титана и схемы сопряжения ОЦК и ГПУ решеток по различным кристаллографическим плоскостям. Для различных вариантов сопряжения оценены изменения удельной энергии  $b/a$  границ в сплаве ВТ6 и техническом титане, легированном водородом, в интервале температур развития  $b$ -апревращения.

	<p>При этом учитывалось влияние состава фаз и температуры на параметры их решеток и упругие характеристики. Установлена принципиальная разница в изменении энергии межфазных <math>b/a</math> границ в титановом сплаве ВТ6 и в титане, легированном водородом, при понижении температуры. Она объясняется противоположным влиянием легирующих элементов замещения и внедрения на параметры решеток фаз: ванадий и алюминий уменьшают параметры решеток <math>b</math> и <math>a</math> фаз титана, а водород – увеличивает. Понижение температуры в процессе <math>b</math>-<math>a</math> превращения в титановом сплаве ВТ6 приводит к увеличению удельной поверхностной энергии всех рассмотренных межфазных границ примерно в 1,3-1,5 раза, но не оказывает значимого влияния на ее анизотропию. В сплавах титана с водородом удельная энергия широкой границы между <math>a</math> и <math>b</math> пластинами в 3–5 раз меньше удельной энергии границ, образующих боковую и торцевую поверхности этих фаз. Энергия межфазных <math>b/a</math> границ, образованных одинаковыми плоскостями сопряжения, в титане, легированном водородом, существенно меньше, чем в сплаве ВТ6.</p> <p>In-situ отжигом в колонне просвечивающего электронного микроскопа тонких фольг ультрамелкозернистого (УМЗ) сплава Al-4% Cu-0,5% Zr (вес. %) показано, что в сплаве при высоких температурах одновременно с ростом зерен происходит и их вращение. При этом процесс роста и вращения наблюдается для зерен, окруженных как большеугловыми, так и малоугловыми границами. По результатам прямого эксперимента и анализа литературных данных можно утверждать, что вращение зерен является общим механизмом релаксации структуры в процессах деформации и отжига.</p>
<p>9. Физическое материаловедение: новые материалы и структуры, в том числе фуллерены, нанотрубки, графены, другие наноматериалы, а также метаматериалы</p>	<p>Методом молекулярной динамики исследованы дискретные бризеры в наводороженном графене. Предложена и обоснована гипотеза о том, что дискретные бризеры могут выступать активаторами разводороживания, поскольку при повышенных температурах отрыв атома водорода происходит с большей вероятностью, если он является ядром дискретного бризера. Данное направление исследования является важным для водородной энергетики, поскольку исследуется возможность</p>

	использования графена для транспортировки и хранения водорода.
<b>III. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ</b>	
<p>23. Механика деформирования и разрушения материалов, сред, изделий, конструкций, сооружений и триботехнических систем при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных сред</p>	<p>Установлено влияние деформационной обработки методом всесторонней изотермической ковки на микроструктуру и механические свойства низкоуглеродистой стали 12ГБА, используемой в нефтяной и газовой промышленности. Показано, что после обработки методом всесторонней ковки с температурой заключительного этапа ковки 550°С в стали формируется УМЗ структура с размером зерен/субзерен 0,5 мкм и равномерным распределением карбидных частиц. В полученном состоянии сталь 12ГБА имеет предел текучести и предел прочности, равные 600 МПа и 730 МПа, соответственно, что в полтора-два раза превышает соответствующие характеристики крупнозернистой стали. Одновременно ударная вязкость стали 12ГБА в УМЗ состоянии сохраняется на весьма высоком уровне, при этом вязко-хрупкий переход начинается при температурах ниже -80°С, то есть температура перехода снижается более чем на 40°С относительно крупнозернистого состояния.</p> <p>Показано, что деформационная обработка трубной стали класса прочности К65 посредством многократной теплой прокатки ведет к измельчению зерен/субзерен феррита и карбидных частиц до размеров 0,4 мкм и 0,1-0,2 мкм, соответственно. При этом частицы карбидов имеют глобулярную форму и относительно равномерно распределены в ферритной составляющей структуры стального материала. Исследованная сталь после многократной теплой прокатки отличается высокими прочностными характеристиками при комнатной температуре. Так, например, предел прочности и предел текучести составляют 852 МПа и 810 МПа, соответственно, что почти в полтора-два раза выше прочностных характеристик данной стали в состоянии после контролируемой прокатки.</p> <p>Методом всесторонней изотермической ковки сплава ВТ6 с исходной тонкопластинчатой и глобулярно-пластинчатой структурой получены однородная УМЗ структура с размером зерен 0,5-0,7 мкм и бимодальная структура,</p>

представляющая собой двухфазную смесь ультрамелких равноосных зерен а и в фаз с размером 0,8-1 мкм и глобулярных зерен первичной а-фазы с размером 5-20 мкм. Прочностные характеристики сплава в обоих состояниях близки по величине. При переходе от однородного УМЗ состояния к бимодальному происходит повышение величины ударной вязкости КСТ в сплаве примерно на 25%.

Исследованы характеристики высокоскоростной сверхпластичности ультрамелкозернистого алюминиевого сплава 1570С (Al-5Mg-0,18Mn-0,2Sc-0,08Zr), подвергнутого холодной прокатке с целью получения листов. Показано, что сплав после прокатки сохраняет способность для обработки в условиях высокоскоростной сверхпластичности в интервале температур 425-500°C, если доля ультрамелких зерен в его структуре до прокатки не превышает 80%. В противном случае сплав теряет эту способность из-за огрубления зеренной структуры при нагреве под сверхпластическую деформацию по причине аномального роста отдельных зерен, а также потери когерентности и огрубления наноразмерных дисперсоидов  $Al_3(Sc,Zr)$ .

Проведено молекулярно-динамическое исследование механизмов деформации нанокристаллических чистого алюминия и бинарных сплавов Al-Co и Al-Mg с распределением легирующих элементов либо вдоль границ зерен, либо в виде твердого раствора. Установлено, что деформация чистого Al связана с зернограницным проскальзыванием и одновременно с миграцией границ зерен. Зернограницные сегрегации могут существенно изменить механизмы пластической деформации. Атомы Mg в границах зерен ведут к миграции границ и росту зерен, в то время как твердый раствор Mg деформируется так же, как чистый Al. В отличие от Mg, зернограницные сегрегации атомов Co задерживают зернограницное проскальзывание и миграцию границ, приводя к более высокой прочности нанокристаллического сплава Al-Co. Прочность сплава с атомами Co в виде твердого раствора очень мала из-за аморфизации структуры, облегчающей пластическое течение. Таким образом, зернограницные сегрегации могут значительно

	<p>влиять на процессы деформации и прочность нанокристаллических алюминиевых сплавов путем воздействия на такие важные механизмы их пластической деформации, как зернограничное проскальзывание и миграция границ зерен.</p> <p>Проведено исследование влияния равноканального углового прессования (РКУП) на микроструктуру и механическое поведение сплава Cu-0,3% Cr-0,5% Zr, находящегося в двух исходных состояниях - твердорастворном и состаренном. В обоих случаях РКУП приводит к существенному увеличению прочности материалов (предел прочности в первом случае достигает величины около 480 МПа, во втором - 510 МПа). Показано, что механическое поведение сплава после РКУП может быть объяснено в рамках модели Орована, усовершенствованной Бэконом, Коксом и Скаттергодом (BKS-model), если учесть дополнительное динамического старение твердого раствора при РКУП при повышенной температуре. Полученные высокопрочные состояния сплава CuCrZr представляют интерес для электротехнических применений.</p> <p>Исследованы микроструктура и механические свойства сплава Al-7Si-0,4Mg, подвергнутого аккумулятивной обратной экструзии в интервале температур 200-500°C. Измельчение зерен, достигаемое только однократной обратной экструзией, позволяет получать состояния, прочностные свойства в котором сопоставимы с характеристиками состояний, полученных РКУП. После экструзии при 200°C пределы текучести и прочности достигают 160 и 400 МПа, соответственно, против 245 и 270 МПа после 10 проходов РКУП. При этом удлинение до разрушения остается в пределах 7-8%, что лишь незначительно ниже пластичности исходного состояния (9%). Результаты показывают, что процесс аккумулятивной обратной экструзии может быть более эффективным и технически более простым способом получения высокопрочных УМЗ материалов, чем другие методы интенсивной пластической деформации.</p>
<p>24. Механика технологий, обеспечивающих устойчивое инновационное развитие инфраструктур и</p>	<p>Для определения возможности восстановления жаропрочных свойств гранульного сплава ЭП741НП после формообразования в условиях</p>



<p>пониженной уязвимости по отношению к возможным внешним и внутренним дестабилизирующим факторам природного и техногенного характера</p>	<p>сверхпластичности, в нем была подготовлена УМЗ структура типа микродулекс и проведена термическая обработка при различных температурах. Варьирование режимов термообработки позволяет получать структурные состояния с различным размером зерен от 10 до 70 мкм. При этом достигается значительное повышение уровня свойств по сравнению со значениями, установленными техническими условиями для сплава ЭП741НП, подвергнутого только горячему изостатическому прессованию: прочностных - на 12-20%, пластических - на 50-75%, характеристик длительной прочности - не менее чем в 3 раза.</p> <p>С целью получения бездефектной заготовки с рекристаллизованной структурой выполнена деформация в толстой оболочке образцов из высоколегированного никелевого сплава экспериментального состава - Ni-50(Co,Cr,W,Ta,Ti,Al,Mo,Nb,Re)-0,1(C,LaY,Ce,B) (вес. %). Сплавы данной группы с повышенным содержанием рения обычно являются монокристаллическими и считаются непригодными для деформации. Показано, что сплав после деформации имеет однородную мелкозернистую структуру и высокие прочностные свойства (<math>\sigma_{\text{в}}=1600</math> МПа, <math>\sigma_{0,2}=1300</math> МПа). Проведение термической обработки с высокотемпературным отжигом на твердый раствор при температуре, близкой к температуре полного растворения <math>\alpha</math> фазы, привело к росту <math>\alpha</math> зерен и, соответственно, к понижению прочностных свойств при комнатной температуре до <math>\sigma_{\text{в}}=1370</math> МПа.</p> <p>Проведены испытания на циклическую трещиностойкость по схеме трехточечного изгиба с нанесенной усталостной трещиной образцов титанового сплава ВТ6 с различной микроструктурой (крупнозернистая пластинчатая, мелкозернистая глобулярная и бимодальная дулексная), а также его твердофазных соединений, полученных линейной сваркой трением. На основе сравнения кинетических диаграмм скорости роста усталостных трещин показано, что циклическая трещиностойкость сварных соединений не уступает трещиностойкости основного металла - титанового</p>
---	--

	сплава ВТ6 в состоянии с мелкозернистой структурой.
29. Триботехника и износостойкость высоконагруженных элементов машин	<p>Установлено, что при электроосаждении покрытий из электролитов, содержащих соли меди, сурьмы и олова, на медной и бронзовой подложке образуется твердый раствор олова, содержащий фазы <math>Cu_6Sn_5</math> и <math>Sn_3Sb_2</math>, по составу близкие к оловянному баббиту Б83 (<math>Sn_{11}Sb_{5.5}Cu</math>). Полученные покрытия в 8-10 раз снижают интенсивность массового изнашивания меди и бронзы на стадии приработки, а на стадии устойчивого износа наблюдается снижение интенсивности массового изнашивания в 3 раза. Проведено компьютерное моделирование процесса износа полученного таким образом покрытия подшипника скольжения. Показано, что наличие покрытия толщиной 0,1 мм с мелкодисперсными и равномерно распределенными частицами <math>Cu_6Sn_5</math> примерно на 15% снижает максимальные напряжения в баббитовом вкладыше и на 12% - в корпусе подшипника.</p>
V. ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ И НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ	
45. Научные основы создания новых материалов с заданными свойствами и функциями, в том числе высокочистых и наноматериалов	<p>Установлено, что экспериментальный сплав состава Ti-45Al-5Fe-5Nb (ат. %) на основе фаз <math>\gamma(TiAl)</math> и <math>\tau_2(Al_2NbTi)</math>, обладает повышенной пластичностью и прочностью на сжатие при комнатной температуре и приемлемой прочностью при повышенных температурах по сравнению с <math>\gamma(TiAl)</math> сплавами последнего поколения. При комнатной температуре были получены следующие свойства на сжатие: <math>s_{1,25} = 960</math> МПа, <math>s_{макс.} = 2250</math> МПа, <math>e = 28</math> %, тогда как сплав Ti-45Al-5Nb-1Mo-0,2В демонстрировал <math>s_{1,25} = 930</math> МПа, <math>s_{макс.} = 1655</math> МПа и <math>e = 16</math> %. Новый сплав показал улучшенную технологическую пластичность при повышенных температурах (<math>T^3</math> 800°C). Потенциальное применение нового сплава – в качестве лопаточного материала с рабочей температурой до 700-750°C, при этом изготовление лопатки, по-видимому, осуществимо посредством штамповки при относительно низких температурах.</p> <p>Предложен новый экспериментальный сплав на основе титанового сплава ВТ8 состава ВТ8-20Zr-0,1В (вес. %). Новый сплав относится к</p>

сверхпрочным титановым сплавом. Для него были получены следующие свойства на растяжение:  $\sigma_B=1560$  МПа и  $d=4\%$  при комнатной температуре,  $\sigma_B=1230$  МПа и  $d=14\%$  при  $T=500^\circ\text{C}$ . Достигнутая удельная прочность при  $T=500^\circ\text{C}$  ( $\sigma_B/\rho \approx 248$  МПа/г $\times$ см $^{-3}$ ) является рекордной при этой температуре для всех известных титановых сплавов. Установлено, что легирование цирконием значительно повышает эффективность термического упрочнения за счет необычного для титанового сплава с относительно невысоким коэффициентом  $\beta$ -стабилизации мартенситного превращения  $\beta \rightarrow \alpha''$  с сохранением остаточной  $\beta$ -фазы при закалке из  $\beta$ -области и образования тонкодисперсной пластинчатой структуры с нанометрической толщиной пластин при последующем старении. Новый сплав может быть использован как конструкционный материал с рабочей температурой до  $500^\circ\text{C}$  в тех случаях, когда требуется повышенная удельная прочность.

Методом сварки давлением в вакууме изготовлен пятислойный композит на основе низкоуглеродистой стали 12ГБА с УМЗ структурой и алюминия. Стальные пластины были вырезаны из заготовки стали 12ГБА, подвергнутой деформационной обработке методом всесторонней изотермическойковки с понижением температуры этапов от  $700$  до  $500^\circ\text{C}$  и имеющей послековки однородную УМЗ структуру со средним размером зерен/субзерен  $0,3$  мкм. В качестве слоя между стальными пластинами использовали алюминиевую фольгу марки АД0 толщиной  $11$  мкм. Диффузионную сварку давлением осуществили при температуре  $500^\circ\text{C}$ , что позволило сохранить в стальном материале УМЗ структуру.

Сваркой давлением с использованием сверхпластичности впервые на практике получено качественное твердофазное соединение разнородных никелевых сплавов, в частности, интерметаллидного сплава ВКНА-25 и никелевого сплава ЭП975 с крупнозернистой структурой, через прослойку из УМЗ сплава ЭП975. Твердофазное соединение после термической обработки характеризуется прочностью на растяжение, составляющей  $0,9$  от прочности интерметаллидного сплава.

